

## 철도터널 라이닝 두께 최적화 검토



최창림  
(주)삼보기술단  
지반사업부 차장



김영근  
(주)삼보기술단  
지반사업부 이사



소충섭  
(주)삼보기술단  
지반사업부 부사장



이두화  
(주)삼보기술단  
대표이사

### 1. 서론

NATM 터널에서는 슛크리트 및 록볼트 등 1차 지보재 시공단계에서 터널 주변 지반변위가 완전히 수렴된 후 콘크리트 라이닝을 시공하게 됨으로서, 콘크리트 라이닝이 개념상 구조적 기능을 담당하고 있지 않음에 따라 그 필요성 여부에 대한 논란이 지속되고 있다.

실제로 절리가 적고 양호한 암반지반에 건설된 스톡홀름 지하철의 경우, 터널정거장 벽면 마감을 슛크리트로 처리하고 콘크리트 라이닝을 생략하였고, 세계 최장대 도로터널(L=24.5km)인 노르웨이 라에르달 터널에서도 양호한 암반구간에서는 무라이닝, 불량한 암반구간에서는 프리캐스트 패널(PC Panel)을 사용하였다. 콘크리트 라이닝의 필요성 여부에 대한 논란은 이론상 수압을 받지 않는 배수형 터널에서 발생되는데 우리나라 대부분의 NATM 터널은 배수형 터널로 설계·시공되고 있어 콘크리트 라이닝의 구조적 필요성 여부에 관한 개념정립이 필요하다. 이론상 콘크리트 라이닝의 구조적 기능이 명쾌하

게 정립되어 있지 않음에도 불구하고 절리가 적은 양호한 암반지반을 제외하고 콘크리트 라이닝의 필요성에 대해 대부분의 터널 기술자들이 동의하고 있다. 현재 국내의 배수형 터널(대부분의 산악 도로 및 철도터널) 설계시 1차 지보재인 슛크리트의 장기적인 기능저하와 부직포의 성능저하로 인한 배수시스템의 막힘현상(Clogging)을 고려하여 이완하중 및 잔류수압을 설계에 반영하고 있다.

본 고에서는 콘크리트 라이닝의 기능 및 역할을 터널공법별로 고찰하고, 국내의 설계 및 시방기준 조사와 철도터널 단면의 지반정수별 구조검토 결과분석, 라이닝 천정부에 설치되는 전차선 매입전 등의 시설을 고려한 적정두께를 검토하고자 하였다.

### 2. 콘크리트 라이닝의 기능 및 역할

라이닝은 재료 구성에 따라 무근콘크리트, 강섬유보강 콘크리트, 철근콘크리트 라이닝, 시공 및 제작방법에 따라

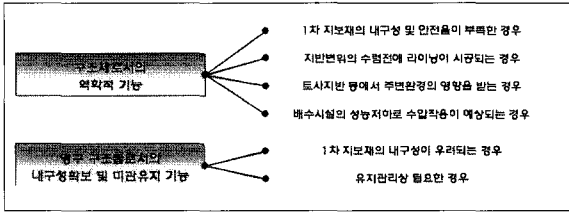


그림 1. 콘크리트 라이닝의 기능

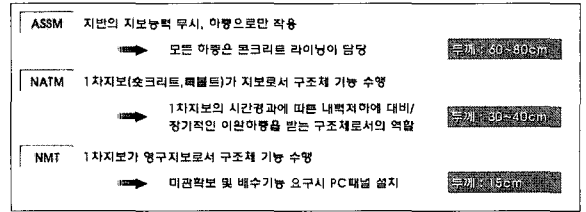


그림 2. 터널공법별 라이닝의 역할

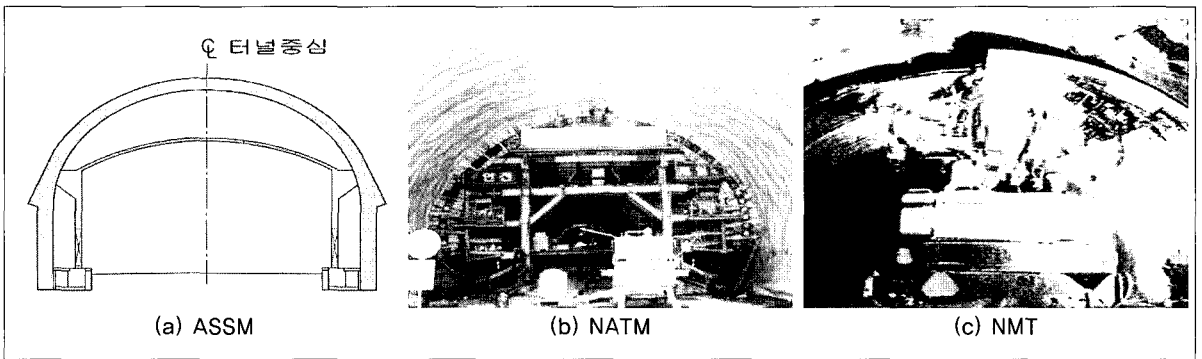


그림 3. 터널공법별 라이닝 단면 및 시공개요도

현장타설 라이닝과 쉐드 세그먼트 라이닝과 같은 프리캐스트 콘크리트 라이닝으로 구분되는데, 여기서는 일반적인 현장타설 라이닝의 기능 및 역할에 대해서 살펴보았다.

콘크리트 라이닝은 구조체로서의 역할적 기능외에 영구구조물로서 내구성 확보 및 미관유지기능을 포함하게 되며, 과거의 ASSM에서는 모든 지반하중을 전달수 있게 설계되었으나, 최근의 NATM에서는 1차지보의 내력저하에 따른 장기적인 이완하중만을 부담하는 것으로 설계되고 있다. 또한 최근 유럽의 일부 국가에서는 1차 지보재의 성능을 강화(고강도숏크리트, 부식방지 록볼트 등)하여 구조체 기능을 수행하게 하고 현장타설 라이닝의 절반두께의 PC Panel을 설치하여 미관을 확보하거나 무라이닝으로 시공된 사례도 보고되고 있다.

이와같이 라이닝은 구조체로서 기능을 담당하는 부재에서 출발하여 현재는 1차 지보재가 지반하중을 주로 담당하고 라이닝은 미관개념으로 점차 개념이 변화하고 있다.

### 3. 콘크리트 라이닝 설계기준 검토

#### 3.1 국내 설계기준 검토

콘크리트 라이닝의 국내 설계기준은 대부분 마제형 또는 난형터널(굴착단면적 35㎡ 기준) 기준으로 30cm를 표준으로 제시하고 있으며, 단면크기, 형상 및 지반조건 등을 반영하여 증감할 수 있도록 각 기관의 설계기준 및 시방서에서 제시하고 있다(표 1~표 2 참조). 현재 산악터널의 경우 설계조건을 고려시 2차선 도로 및 철도 복선터널의 경우 30~40cm 정도이면 제조조건을 만족하는 것으로 평가되고 있으며, 과거 철도청 표준도의 경우 최소 20cm까지 적용된 경우도 있다(표 3, 그림 4 참조). 국내 지하철 및 도로에서도 30~40cm를 표준으로 제시하고 있으나, 일부 지침서에서는 라이닝 두께를 명확하게 확립하는 것은 곤란한 것으로 표현하고 있다.

표 1. 국내 설계기준 검토

적용 기준	라이닝 두께	비고
터널설계기준(1999)	굴착단면적 35㎡ 마제형 또는 난형터널 : 30cm를 표준으로 함	단면크기 및 형상, 지반조건 등 현장조건을 반영하여 증감
철도설계기준(2004)		
철도설계편람(2004)		

표 2. 터널관련 시방서 검토

적용 기준	라이닝 두께	비고
터널표준시방서(1996)	굴착단면적 35㎡ 마제형 또는 난형터널 : 30cm를 표준으로 함	단면크기 및 형상, 지반조건 등 현장조건을 반영하여 증감
철도전문시방서(2004)	두께규정 없음	시공오차 : 설계두께 이상

표 3. (구)철도청 표준도(1977)

표준도	적용 조건	라이닝 두께(cm)
제1종형 터널라이닝(직곡선) : 1,2급선	기초와 인버트아치가 없을때	20~60
제2종형 터널라이닝(직곡선) : 3,4급선	기초가 있을때	40~60
	복선터널 라이닝 : 1,2급선	인버트 아치가 있을때

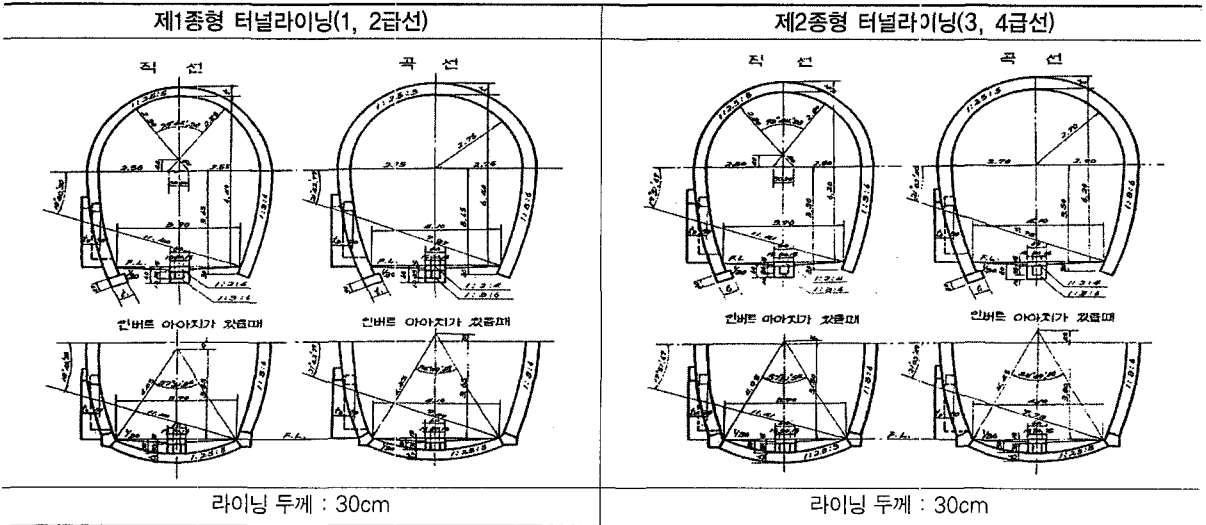


그림 4. (구)철도청 표준도(1977)

### 3.2 국외 설계기준 검토

콘크리트 라이닝과 관련된 국외설계기준 및 사례는 아래 표 6과 같다. 일본의 경우 국내 암반조건보다 불리한

경우가 많이 보고되고 있으나 라이닝 두께는 20~40cm를 일반적으로 적용하고 있으며 철도에서는 대체적으로 30cm를 주로 적용하고 있다.

또한 유럽에서는 일부 도심지에 건설되는 지하철을 제

표 4. 지하철 설계기준

적용 기준	라이닝 두께	비고
서울지하철 9호선 서울지하철 3호선연장 서울지하철 7호선연장	단선터널 마제형 및 난형터널 기준 라이닝 두께 : 30cm를 표준으로 함	단면크기 및 형상, 지반조건, 작용하중, 사용재료, 시공법 등을 고려하여 결정

표 5. 도로 설계기준

적용 기준	라이닝 두께	비고
국도건설공사 설계실무요령(2005)	라이닝 두께 수치로 기술하지 않음	하중 및 시공조건에 따라 무근 및 철근콘크리트 적용
도로설계요령(2000)	갱구부를 제외하고 단면크기에 따라 통상 30~40cm 적용, 2차로 기준으로 30cm가 표준으로 적용됨	라이닝 두께는 토압의 상태와 콘크리트 라이닝의 역학적 작용 등이 명확하지 않으므로 확립시키는 것은 곤란
도로설계편람(2000)	굴착단면적 35㎡ 마제형 또는 난형터널 : 30cm를 표준으로 함	단면크기 및 형상, 지반조건 등 현장조건을 반영하여 증감

표 6. 해외 라이닝 설계기준 및 사례

구분	적용 기준	라이닝 두께(cm)	비고
일본	산악터널 표준시방서	20~40	• 내공단면에 따라 차등 적용 • 연약파쇄대, 갱구부제외
	NATM설계 시공지침	25~30	• 단선 25cm 적용 • 복선, 신간선 30cm 적용 • 지반조건 불량시 30cm 이상 적용
	국철 설계표준시안	30	• 단선, 복선 적용 • 지반등급에 무관
유럽	Norwegian Design Guide (Road tunnel)	30	• 허용한계 30±5cm
	오스트리아 연방철도	30	• 단선, 복선 적용
	독일 연방철도		• 구조해석결과에 따라 무근/철근콘크리트 라이닝 적용
	독일 뮌헨지하철	35	• 단선, 복선 적용
오스트리아 비엔나 지하철	40	• 철근콘크리트 라이닝 적용	

의하고 30cm를 주로 적용하고 있는 것으로 조사되었다.

#### 4. 콘크리트 라이닝의 적정 두께 검토

일반적으로 철도터널 라이닝 두께는 30~40cm를 적용

하고 있고, 적용단면에 대한 구조검토를 실시하여 무근 및 철근보강을 결정하게 된다.

기존 설계사례에서 무근라이닝 구간의 구조해석결과를 검토해보면 발생응력에 많은 여유율을 가지고 있으며 이에 단선 및 복선터널 라이닝의 두께를 20cm, 25cm로 하여 적정두께를 구조계산을 통하여 검토하였다.

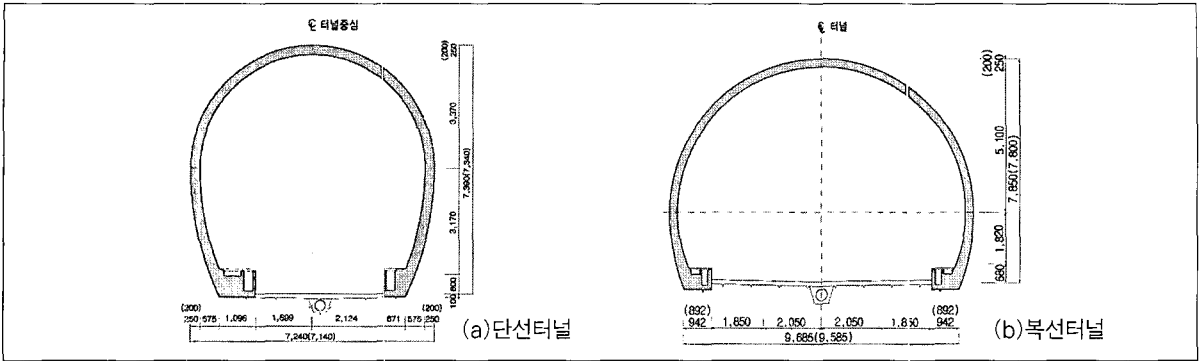


그림 5. 단선터널 및 복선터널 검토단면(라이닝 두께 t=20cm, t=25cm)

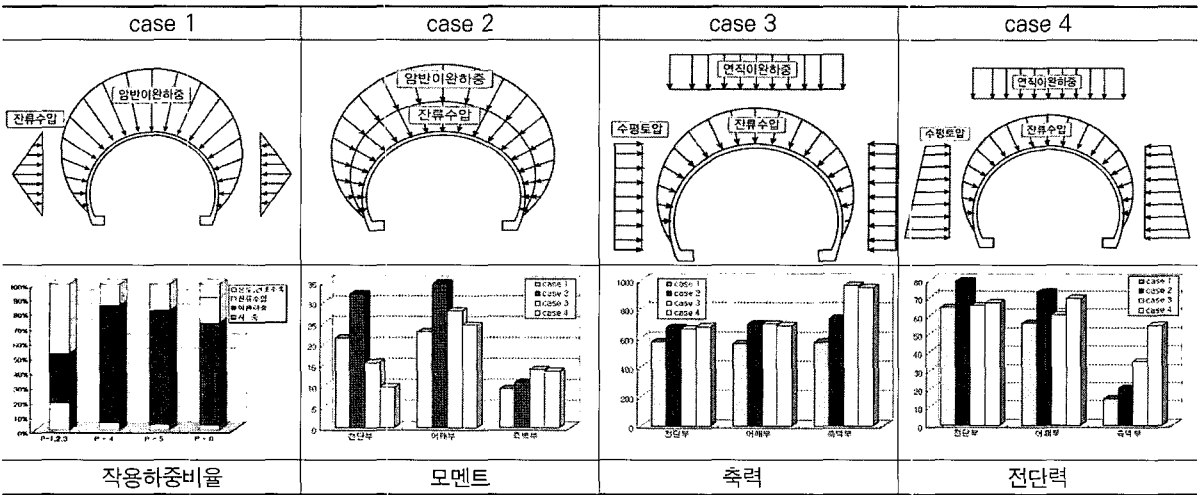


그림 6. 하중 case별 부재력 결과도

### 4.1 하중적용 방법 검토

해석에 사용된 표준단면은 최근 복선 지하철도에 적용된 단면을 예제로 사용하였으며, 라이닝 구조계산을 위한 발파이완하중 및 잔류수압의 하중적용은 4가지 경우에 대한 예비검토를 통하여 모멘트가 크게 발생하는 경우 (case 2)를 적용하여 구조계산을 수행하였다.

### 4.2 구조검토 결과분석

단선 및 복선터널에 대한 구조검토는 라이닝 두께

20cm, 25cm인 두가지 경우와 지반 변형계수는 암반등급 II~III등급에 해당하는 정도의 3,000~9,000MPa로 변화시켜 적용하였으며, 하중조합은 자중, 발파이완하중, 잔류수압을 고려하여 허용응력검토를 수행하였다. 본 해석에 적용된 구조검토 프로그램은 범용 유한요소해석법을 이용한 SAP2000을 사용하였다.

구조검토결과 단선터널 및 복선터널의 압축응력은 모두 허용치( $f_{ca} = 0.4 \times 24\text{MPa} = 9.6\text{MPa}$ ) 이내의 값을 나타내었으며, 인장응력에 대한 검토결과는 변형계수의 크기에 따라 허용치( $f_{ta} = 0.13 \times 24\sqrt{\text{MPa}} = 0.64\text{MPa}$ )내외로, 무근 및 철근보강 구간으로 분류됨을 확인할 수 있었다.

표 7. 라이닝 두께 및 변형계수에 따른 허용응력 검토 결과(단선터널)

(단위 : MPa)

변형계수	25cm		20cm		비 고
	압축응력	인장응력	압축응력	인장응력	
9,000	1.581	-0.493	1.968	-0.643	• 허용압축응력 9.6MPa • 허용인장응력: 0.64MPa • 부호규약 (+) : 압축 (-) : 인장
7,000	1.646	-0.562	2.056	-0.705	
6,000	1.692	-0.612	2.055	-0.736	
5,000	1.756	-0.682	2.113	-0.798	
4,000	1.783	-0.713	2.185	-0.875	
3,000	1.811	-0.743	2.316	-1.014	

표 8. 라이닝 두께 및 변형계수에 따른 허용응력 검토 결과(복선터널)

(단위 : MPa)

변형계수	25cm		20cm		비 고
	압축응력	인장응력	압축응력	인장응력	
7,000	2.192	-0.419	2.661	-0.490	• 허용압축응력 : 9.6MPa • 허용인장응력 : 0.64MPa • 부호규약 (+) : 압축 (-) : 인장
6,000	2.248	-0.479	2.704	-0.536	
5,000	2.321	-0.559	2.777	-0.614	
4,000	2.422	-0.670	2.864	-0.707	
3,000	2.550	-0.810	3.008	-0.862	

허용응력 검토결과 단선터널의 경우 라이닝 두께 25cm 적용시, 변형계수 6,000MPa 이상, 두께 20cm 적용시 변형계수 9,000MPa 이상일 경우 무근라이닝 적용이 가능할 것으로 검토되었다.

복선터널의 경우 라이닝 두께 25cm 적용시, 변형계수 4,000MPa 이상, 두께 20cm 적용시 변형계수 5,000MPa 이상일 경우 무근라이닝 적용이 가능할 것으로 검토되었다.

이상의 결과로부터 단·복선터널의 라이닝 두께 25cm, 변형계수 5,000~6,000MPa 이상의 암반(암반등급 II등급 정도)에서는 무근적용이 가능한 것으로 판단되었다(표 7~8, 그림 7 참조).

## 5. 전차선 설치를 위한 라이닝 두께 검토

현재 철도사업은 전철화 계획으로 신설노선에 전동차 운행이 가능하도록 다수의 설계·시공이 진행중에 있다.

철도터널의 콘크리트 라이닝에 운행차량 전력공급을 위한 전차선이 설치되어야 하며, 라이닝은 상술한 고유의 기능 외에도 전차선을 고정지지하는 역할이 주어진다.

따라서, 전차선 매입전 설치방식에 따라 라이닝의 두께를 검토해 볼 필요가 있으며, 그림 8은 대표적인 전차선의 설치방식을 나타낸 것이다.

앵커볼트 방식은 과거에 주로 일반철도 터널구간에 사용되던 방식이며, 터널내 전력시설을 개별적으로 지지하는 방식으로 고정력은 정착길이(20cm)에 의존하고 있다.

반면에 C채널 방식은 최근의 고속철도 터널구간에 사용되었으며, 현재 일반철도 터널구간(고속철도 전철전력 시설지침, 2004)에도 적용되고 있는 전차선 고정방식이며, 여러 개의 고정볼트가 연결된 C채널이 전력시설에 의한 하중을 분산시키는 역할을 수행하게 되며, 고정볼트는 콘크리트와의 마찰력 증대를 위하여 주름져 있어 정착길이는 16cm 정도에 불과하다.

터널 천단부의 경우에 콘크리트 채움부족으로 배면공동이 발생하기 쉽고, 천단부 배면공동은 터널종방향 균열

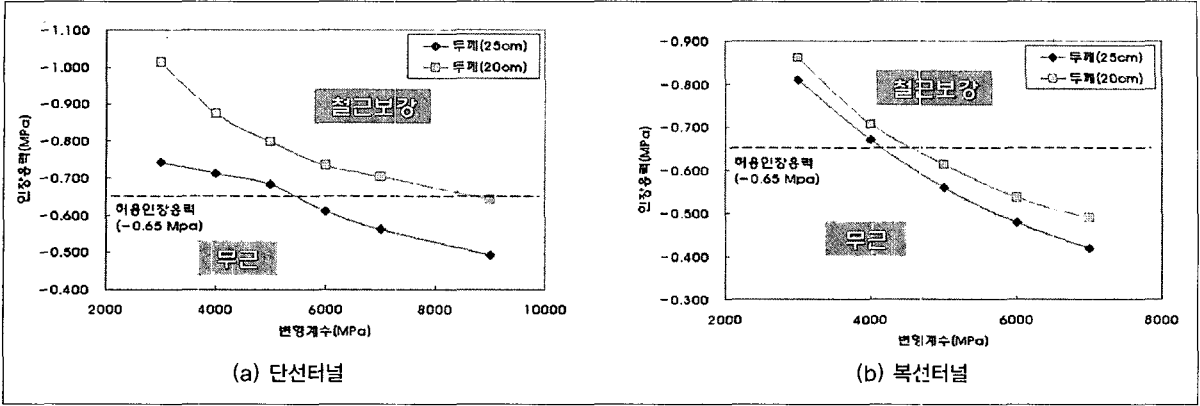


그림 7. 변형계수에 따른 허용응력 검토결과

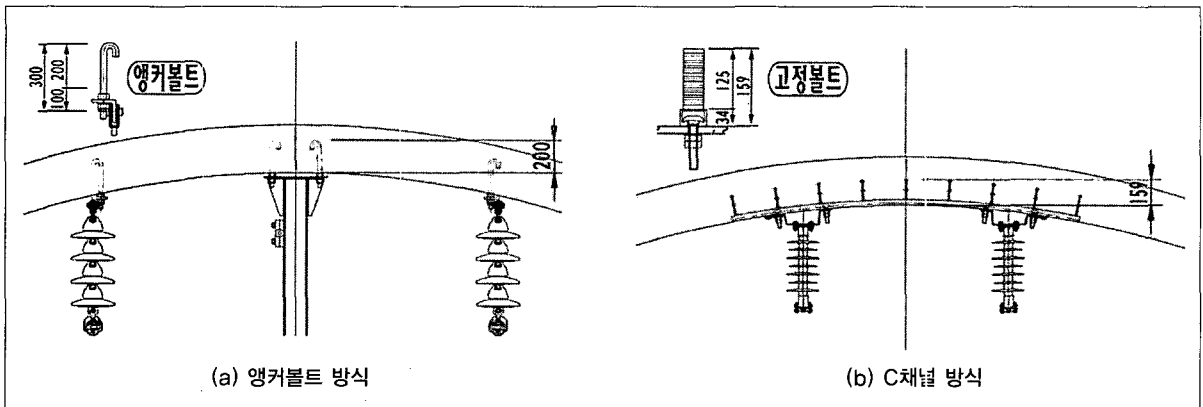


그림 8. 전차선 매입전 설치방식에 따른 라이닝 최소두께

을 발생시킬 수 있기 때문에 전차선 고정방식을 천단부에서 주전력선을 지지하는 앵커볼트방식을 적용할 경우가 C채널방식을 사용하는 경우보다 시공오차 및 하중집중 등으로 인한 위험도가 높은 것으로 판단된다.

또한 선형조건에서 터널이 위치한 구간이 직선이 아닌 곡선부의 경우에 앵커볼트방식은 횡단구배에 따라 정확한 매입전 위치에 앵커를 선시공하는 것이 곤란하나, C채널방식은 횡단구배에 따라 전철주 위치이동이 가능하므로 시공성 측면에서 유리한 것으로 판단된다.

지금까지 전차선 매입전 설치방식에 따른 콘크리트 라이닝의 두께를 검토하였다.

앵커볼트 및 C채널 고정볼트의 정착길이와 라이닝의 시공허용오차를 고려할 때 현재 주로 사용되고 있는 C채널방식을 적용할 경우 라이닝 두께 축소가 가능할 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 고에서는 철도터널 최적의 라이닝 두께를 검토하기 위하여 라이닝의 기능 및 역할, 국내 설계 및 시방기준, 국외 설계기준 및 사례검토, 일반적인 터널 단면에 대한

구조검토를 통하여 최적두께를 검토하였다. 또한 철도터널의 경우 라이닝 천정부 벽면에 설치되는 전력선 설비에 대한 영향을 고려하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 라이닝은 1차지보재의 내력저하에 대비한 구조체로서 역할, 영구구조물로서의 내구성 확보 및 미관유지 기능 등이 있으며, 최근의 라이닝 개념은 구조체 기능에서 탈피하여 1차 지보재가 지반하중을 주로 담당하고 라이닝은 미관유지로 점차 개념이 변화하고 있는 것으로 나타났다.
- 라이닝 두께에 대한 국내외 기준 및 사례 검토결과, 30~40cm를 표준으로 하고 있으며 단면크기 및 형상, 지반조건 등 현장조건을 반영하여 증감할 수 있으며, (구)철도청 표준도 및 일본의 경우 라이닝 두께는 최소 20cm인 것으로 확인되었다.

- 배수형터널 라이닝의 발파이완하중을 고려한 구조 검토결과 양호한 암반등급(Ⅱ등급 이상)에서는 라이닝 두께 20~25cm로 축소시 허용응력 이내로 안전한 것으로 검토되었다.
- 철도터널의 전차선 매입전 설치를 위한 방법에는 앵커볼트방식 및 C채널방식이 있는데, 고속철도 및 최근 설계에 주로 이용되는 C채널 방식을 적용할 경우는 라이닝 두께 축소가 가능한 것으로 분석되었다.
- 이상에서 살펴본 바와 같이, 라이닝 두께는 이완하중, 잔류수압 및 지진 등에 의한 영향, 1차지보재인 슛크리트의 장기적인 내구성 저하에 따른 영향, 단면의 크기에 대한 영향, 지반조건에 따른 영향 등을 종합적으로 고려하여야 하며, 양호한 암반에서는 라이닝 두께(t=20~25cm)를 축소할 수 있을 것으로 판단된다.